Aus dem Physiologischen Institut der Universität Bonn.
Direktor: Prof. Dr. Ebbecke.

„Der Einfluß hoher Drucke auf den Ruhestrom der Froschhaut."

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität
zu Bonn.

Vorgelegt am 17. Oktober 1939
von
Heinrich Mückter
aus Körrenzig, Kr. Jülich.

BONN 1939
Anton Brand, Bonn

Gedruckt
mit Genehmigung der medizinischen Fakultät
der Universität Bonn.

Referent: Prof. Dr. Ebbecke
Korreferent: Prof. Dr. Siebke.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinen Eltern!

DISPOSITION.

1. Biologische Wirkungen des Druckes.
2. Druck und elektro-biologische Erscheinungen.
   a) Muskel,
   b) Haut.
3. Vorversuche:
   a) Kupferdraht,
   b) Stahlspirale,
   c) Kupferelektroden und $CuSO_4$,
   d) unpolarisierbare Elektroden,
   e) thermische Untersuchungen.
4. Physikalische Erläuterungen:
   a) Druckeffekt,
   b) thermischer Effekt,
   c) Vergleich zwischen Leiter 1. u. 2. Klasse.
5. Hautversuche:
   a) Versuchsanordnung,
   b) große Kurve: lebende Haut-tote Haut,
   c) Vergleich zwischen gedrückter und ungedrückter Haut,
   d) primär hoher Druck,
   e) Capillarelektrometer.
6. Deutung der Hautversuche.
7. Zusammenfassung.

Nachdem frühere Untersuchungen an biologischen Objekten gezeigt hatten, daß der Druck bei entsprechender Dosierung zunächst einen Reiz-, dann einen Narkose- und schließlich einen Lähmungszustand herbeiführt, lag es nahe, den Einfluß des Druckes auf die elektrischen Äußerungen lebender Gebilde zu studieren. Versuche, den Aktionsstrom des Herz- und Skelettmuskels vom Frosch unter Druck zu untersuchen, blieben unbefriedigend, da die beobachteten Stromschwankungen keine klare Linie erkennen ließen. Daher wurde versucht, den Ruhestrom der biologisch weniger hochdifferenzierten Froschhaut auf sein Verhalten unter Druck zu prüfen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in dieser Arbeit wiedergegeben und erörtert.

Bevor wir zu den eigentlichen Hautversuchen schreiten, werden einige Vorversuche durchgeführt, die den Zweck verfolgen, die biologische Wirkung des Druckes abzugrenzen gegen seine physikalischen Nebenwirkungen.

Versuchsanordnung:

Ein kleines Kautschukgestell, das schon bei früheren Druckversuchen mit elektrischen Messungen Verwendung gefunden hat und zu diesem Zweck mit Zuleitungsdrähten versehen ist, wird mit den oberen Endstücken der Drähte am Verschlußkonus der Bombe befestigt und in die mit Paraffinöl gefüllte Bombe versenkt. Die Drähte haben durch den Verschluß der Bombe hindurch Verbindung mit einem Siemens'schen Türmchengalvanometer, bei dem 1 Teilstrich $1{,}2 \cdot 10^{-7}$ A anzeigt.

Versuche:

Zunächst wird ein etwa 5 cm langer Kupferdraht zwischen den unteren Endstücken der Zuleitungsdrähte angebracht, mit Gleichstrom (1/100 Volt) beschickt und unter einen Druck von 800 Atm. gesetzt: Das Türmchengalvanometer zeigt keine Stromänderung. Der kurze Kupferdraht wird gegen eine etwa 10mal so lange Stahlspirale von

kleinerem Kaliber ausgewechselt, und die mit 1/100 Volt Gleichstrom beschickte Spirale unter Druck gesetzt.

Dabei zeigt das Galvanometer folgende Schwankungen:

1. Während des Druckanstiegs ändert der Strom sich nicht.
2. Nach erreichter Druckhöhe fällt der Strom unter dem konstant bleibenden Druck um einige Skalenteilstriche für die Dauer von 2—3 Minuten und steigt dann langsam innerhalb der folgenden 3 Min. wieder bis zur Ausgangsgröße.

Die Stahlspirale wird entfernt; an den unteren Endstücken der Zuleitungsdrähte werden zwei amalgamierte Kupferelektroden angebracht. (Die sonst üblichen Zinkelektroden haben sich wohl infolge des Messingcharakters der Zuleitungsdrähte bei früheren Versuchen als unbrauchbar erwiesen.) Die Kupferelektroden werden durch conz. $CuSO_4$ verbunden. Die nicht ganz gleiche Beschaffenheit der beiden Elektroden bedingt einen kräftigen Eigenstrom. Dann wird das Ganze unter einen Druck von 800 Atm. gesetzt. Dabei steigt der Strom rapide um etwa 100% des Ausgangswertes und strebt nach erreichter Druckhöhe mit verlangsamter Geschwindigkeit einem Gipfelpunkt zu.

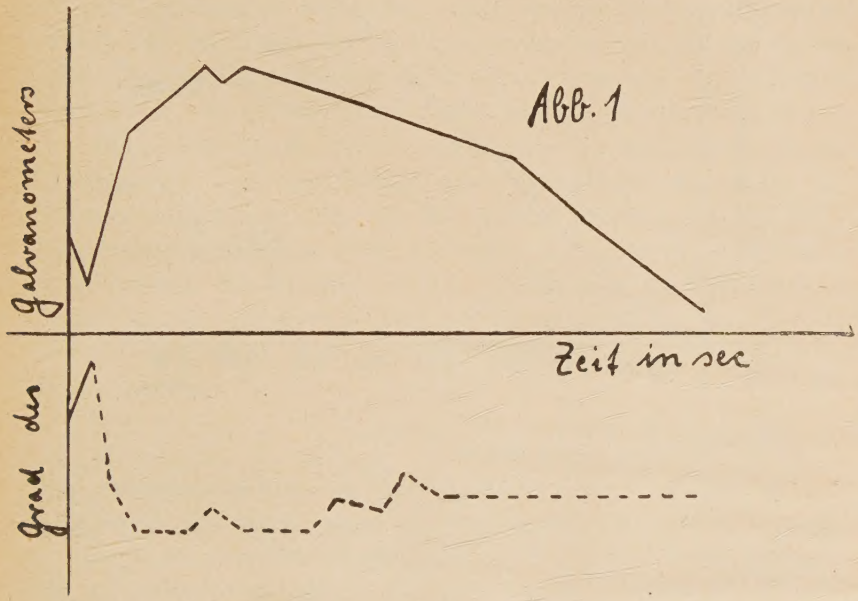
In die $CuSO_4$-Säule wird eine mit physiol. NaCl durchtränkte Tonschicht zwischengeschaltet. Die auf diese Weise erzielten unpolar. Elektroden zeigen einen von Versuch zu Versuch verschieden großen Eigenstrom, dessen Vorhandensein und Größe davon abhängt, wie weit es gelingt, die Elektroden exakt und sauber herzustellen.

In zahlreichen Versuchen ergibt sich ein ziemlich einheitliches Verhalten dieses Eigenstroms unter Druck:

1. Während des schnellen Druckanstiegs fällt der Eigenstrom ballistisch und ohne nennenswerte Latenzzeit und zwar um so stärker, je höher der Druck ist.
2. Unter konstantem Druck steigt der Eigenstrom kontinuierlich wieder bis zu einem bestimmten Maximum und fällt dann kontinuierlich ab.
3. Bei schnellem Ablassen des Druckes steigt der Eigenstrom ballistisch und ohne nennenswerte Latenzzeit und zwar umso stärker, je größer das Druckgefälle ist.

4. Der ballistischen Stromzunahme beim Abblassen des Druckes folgt ein kontinuierliches Abfallen des Eigenstroms bis zu einem bestimmten Minimum. Dann steigt der Strom etwas, ohne die Ausgangsgröße zu erreichen, und bleibt dann ziemlich konstant.

Die graphische Darstellung (Nr. 1) gibt einen solchen Druckversuch wieder.



Zum Abschluß der physikalischen Vorversuche werden die thermischen Veränderungen, die sich unter dem Einfluß des Druckes ergeben, untersucht. Es zeigt sich, daß jeder Stoff unter Druck eine Temperatursteigerung erfährt, die neben der Druckhöhe wahrscheinlich der Viskosität proportional ist. Bei Ablassen des Druckes erfolgt eine entsprechende Abkühlung.

Abb. 2 gibt die Temperatur-Druckkurven für Wasser (gestrichelt) und Paraffinöl wieder, die Dierkesmann durch Bolometer-

messungen ermittelte, und die sich durch unmittelbare Messung mit dem Quecksilberthermometer bestätigen ließen.

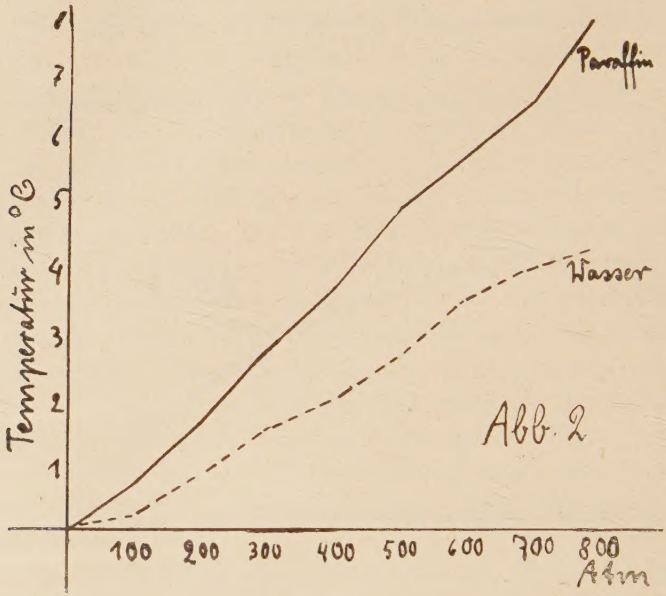


Abb. 2

Physikalische Erläuterungen:

Im folgenden soll versucht werden, die am Galvanometer beobachteten Stromschwankungen mit den unter Druck bzw. Druckabfall erzielten Veränderungen in gesetzmäßige Beziehungen zu setzen.

Die Stromkurve der Drahtspirale ergibt sich offenbar aus Widerstandsveränderungen im Bereich der Spirale. Eine direkte Leitungsveränderung durch Drucke bis 800 Atm. läßt sich mit den hier verwandten Meßinstrumenten nicht nachweisen. Die beobachteten Stromschwankungen sind indirekter Natur und auf thermische Einflüsse zurückzuführen: Die Drahtspirale erfährt nämlich durch das erheblich comprimierte und dabei beträchtlich erwärmte Paraffinöl eine secundäre Temperaturerhöhung und mit der Abkühlung des Paraffins an seiner Umgebung, dem Stahlmantel der Bombe, einen Temperaturabfall. Die durch diese Temperaturänderungen bedingten Wider-

standsänderungen der Drahtspirale erklären die am Galvanometer beobachteten Stromschwankungen. Es muß aber betont werden, daß die Stromschwankungen in Anbetracht des hohen Grundstromes sehr klein sind.

Das refraktäre Verhalten des Kupferdrahtes beim ersten Vorversuch erklärt sich aus der geringen Länge des Kupferdrahtes. Bezüglich des 3. Vorversuches, wo die Kupferelektroden durch conz. $CuSO_4$ verbunden werden, läßt sich folgendes sagen: Das unmittelbar mit Druckbeginn einsetzende rapide Steigen des Eigenstromes bedeutet, daß der Druck das Leitungsvermögen des $CuSO_4$ in starkem Maße fördert. Die mittelbare Wirkung des Druckes, die Erwärmung des $CuSO_4$ und des Paraffins, drückt sich im gleichen Sinne aus.

Im 4. Vorversuch sind die ballistischen Stromschwankungen bei Druckanstieg und Druckabfall als unmittelbare Wirkungen des Druckes aufzufassen. Die bei konstanter Drucklage beobachteten Stromänderungen bilden die Resultierende aus den entgegengerichteten Komponenten des Druckes und der Erwärmung. Nach Druckabfall macht sich die Abkühlung durch ein vorübergehendes Absinken des Stromes bemerkbar. Nach erfolgtem Temperaturausgleich bleibt der Strom konstant.

Auf Grund des vorliegenden Untersuchungsmaterials soll nun versucht werden, die Wirkung des Druckes zusammenfassend zu erörtern. Stets wird dabei zu unterscheiden sein zwischen der unmittelbaren Wirkung des Druckes, dem eigentlichen Druckeffekt, und der mittelbaren, der durch den Druck erzeugten Temperaturveränderung. Zunächst gilt es, den Druckeffekt etwas näher zu beleuchten:

Der Leiter 1. Klasse wird durch die bei meinen Versuchen verwandten Drucke unmittelbar praktisch nicht beeinflußt. Die mittelbaren, durch Temperatureinflüsse von seiten der Umgebung bedingten Widerstandsänderungen sind bei der Kürze der Metallstrecken im Bereich der Bombe so gering, daß sie kaum ins Gewicht fallen.

Bezüglich des Leiters 2. Klasse gelten die bekannten physikalischen Gesetze:

1. Der Druck fördert unmittelbar die Dissoziation.

2. Der Druck erhöht unmittelbar die Viskosität und hemmt dadurch die Ionenwanderung.
3. Der Druck steigert mittelbar durch Erhöhung der Temperatur die Wanderung der Ionen.

Aus dem starken Überwiegen von 1. und 3. über 2. erklärt sich die erhebliche Stromzunahme beim 3. Vorversuch.

Demnach müßte im 4. Vorversuch bei Druckanstieg der Eigenstrom der Elektroden zunehmen, was er aber nur tut, wenn der Druckanstieg langsam erfolgt. Es muß also im Druckanstieg ein Effekt liegen, der mit erhöhter Druckleistung in steigendem Maße den Druckwirkungen 1. und 3. entgegenwirkt. Es erheben sich nun 2 Fragen:

1. Wo greift dieser Effekt an?
2. Wie greift dieser Effekt an?

Die erste Frage läßt sich mit einiger Sicherheit dahingehend beantworten, daß das Angriffsfeld der den Eigenstrom vermindernden Druckkomponente in dem System Ton-physiol. NaCl-Cu SO_4 zu suchen ist. Denn die mit Cu SO_4 verbundenen Kupferelektroden (3. Vorversuch) zeigen unter Druck keine Stromabnahme. Schwieriger ist die Beantwortung der zweiten Frage: Vielleicht handelt es sich um Widerstandsveränderungen, die durch Verengerung der Porenweite des Tonsiebs und durch Verlängerung der widerstandsreichen Tonstrecke durch Hineindrängen des Tons in die mit Cu SO_4 gefüllten Glasröhrchen der unpol. Elektroden zustandekommen.

Wie der Druck auf die Grenzflächen Kupfer-$CuSO_4$ einerseits, und $CuSO_4$-NaCl anderseits wirkt und damit die elektromotorische Kraft beeinflußt, muß dahingestellt bleiben. Die mittelbare Komponente des Druckes, der thermische Effekt, soll im folgenden besprochen werden.

Während Temperaturerhöhungen bekanntlich den Widerstand bei Leitern 1. Klasse erhöhen, wirken sie auf Leiter 2. Klasse gerade umgekehrt: Denn mit gesteigerter Brown'scher Molekularbewegung wandern auch die Träger der Elektrizität, die Ionen, schneller. Temperaturerniedrigungen wirken sich entsprechend im umgekehrten Sinne aus.

Die flüssige Phase der unpol. Elektroden, die physiol. NaCl der Tonpfropfen sowie das $CuSO_4$, erwärmt sich dabei um etwa $0{,}17^0$ pro 100 Atm. Die dadurch bedingte Stromzunahme wird im allgemeinen überkompensiert durch den entgegengesetzt wirkenden Druckeffekt. Dabei übertrifft der Druckeffekt den thermischen Effekt umso stärker, je größer die Druckleistung, d. h. der Druckzuwachs in der Zeiteinheit, ist. So läßt sich z. B. durch langsames Hochdrücken der Bombe (etwa je 100 Atm. in 10 Sekunden = 80 Sek. für 800 Atm.) der Druckeffekt völlig unterdrücken, sodaß die Stromkurve von Anfang an einen kontinuierlich aufwärts strebenden Verlauf zeigt. Nach Ausgleich der Temperatur bleibt nur die im entgegengesetzten Sinne wirkende Druckkomponente übrig: Die Stromkurve sinkt ab.

Bleibt der Druck auf einer konstanten Höhe stehen, so steigt die Stromstärke bis zu einem bestimmten Maximum und fällt dann wieder gleichmäßig ab. Diese Erscheinung, die in allen Versuchen regelmäßig wiederkehrt, beruht auf einer Wärmewelle, die vom Paraffinöl ausgeht. Die höhere Viskosität des Paraffins bildet wahrscheinlich die Ursache für eine entsprechend stärkere Erwärmung des Paraffins gegenüber der flüssigen Phase der unpol. Elektroden unter dem Einfluß des Druckes (Vgl. die Kurven in Abb. 3: Paraffin $0{,}9^0$ pro 100 Atm. contra Wasser $0{,}5^0$ pro 100 Atm. im Durchschnitt.) Das Paraffin gibt nun seine Wärme an die Umgebung, also auch an die unpol. Elektroden ab: Diese sekundäre Wärmewelle läßt die Stromkurve einem Gipfelpunkt zustreben und nach Ausgleich der Temperaturdifferenzen innerhalb der Bombe wieder abfallen. Zeitlich liegt dieser Gipfel zwischen 50 und 100 Sek. vom Beginn des Druckes an gerechnet. Die Stromkurve nach Ablassen des Druckes läßt sich entsprechend im umgekehrten Sinne deuten.

Abschließend läßt sich sagen, daß die Kurve des Eigenstromes bestimmt wird durch zwei antagonistische Effekte: Druckanstieg bzw. Druckabfall- und Erwärmungs- bzw. Abkühlungs-Effekt. Das Galvanometer zeigt in jedem Falle die Resultierende aus diesen Komponenten an:

Vergleicht man die Wirkung beider Effekte auf Leiter 1. und 2. Klasse, so kommt man zu folgendem Ergebnis:

1. Der Druckeffekt, der sich am Leiter 1. Klasse mit den hier verwandten Meßinstrumenten überhaupt nicht nachweisen läßt, wird am Leiter 2. Klasse stets sichtbar, vorausgesetzt, daß der Druckanstieg bzw. Druckabfall eine genügende Steilheit aufweist.
2. Der thermische Effekt, der sich am Leiter 1. Klasse nur in geringem Maße und nur bei hinreichend großer Einwirkungsstrecke kundtut, ist beim Leiter 2. Klasse stets deutlich zu erkennen.

Nach diesen die physikalischen Grundbedingungen etwas klärenden Vorversuchen werden die Hautversuche in Angriff genommen. Wenn der Eigenstrom bei den „Elektrodenversuchen" gelegen kam, um daran Druck- und Wärmeeffekt zu studieren, wird nun versucht, unpol. Elektroden anzufertigen, die möglichst frei von Eigenpotential sind. Deshalb wird das alte Elektrodengestell mit seinen ungleich langen Messingleitungen verlassen und ein neues, vereinfachtes angefertigt (Abbildung 3):

Abb. 3

Ein kleines, massives Kautschukstück wird durchbohrt von zwei isoliert verlaufenden, amalgamierten Kupferdrähten (2 mm D.). Diese Drähte passen mit ihren oberen Endstücken in entsprechende Buchsen des Verschlußkonus der Bombe. Die unteren Endstücke tragen die amalgamierten Kupferelektroden, die in ein Glasröhrchen mit conz. $CuSO_4$ tauchen. Die Glasröhrchen haben einen lichten Durchmesser von 2,2 mm (Abbildung 3) und sind durch eine Gummidichtung mit den Kupferelektroden fest verbunden. Das freie Ende der Glasröhrchen ist so gebogen, daß die abschließenden Tonpfropfen einander anschauen. Zwischen die Kupferdrähte läßt sich eine zweite Kautschukplatte, die im rechten Winkel zur ersten steht, bequem einklemmen. Sie trägt in der Höhe der Tonpfropfen ein rundes Fenster, in das die Froschhaut leicht und sicher eingespannt werden kann. Mit dieser neuen Apparatur gelingt es in den meisten Versuchen bei genauem und sauberem Arbeiten angenähert Eigenpotential-freie unpol. Elektroden zu schaffen. Vor jedem Versuch werden die unpol. Elektroden neu angefertigt und auf ihren Eigenstrom geprüft. Dann wird unter Markierung der Zeit ein Frosch des Ranariums decapitiert und die Haut, meist vom Rücken des Frosches, schnell und unbeschädigt in die beschriebene Kautschukplatte eingespannt und mit Igelstacheln fixiert. Nachdem die Haut zu beiden Seiten mit feuchtem Ton zugedeckt ist, wird sie in ihrem Kautschukrahmen zwischen den Tonpfropfen der unpol. Elektroden fest verankert. Durch eine leichte Biegung der Kupferstäbchen werden die Tonpfröpfe dem Ton des Hautfensters angedrückt. Das nunmehr versuchsfertige Präparat wird mit dem Verschlußkonus verbunden und in die mit Paraffinöl gefüllte Bombe getaucht. Am Nachbartisch wird das justierte Türmchengalvanometer durch einen gewöhnlichen Kurzschlüssel in den Stromkreis des Präparates eingeschaltet. Unter genauer Zeitkontrolle mit der Stoppuhr werden die Stromwerte registriert.

Die Frösche werden dem Ranarium des physiologischen Institutes entnommen, wobei sich die Winterfrösche als besonders brauchbar gegenüber den lebensschwachen Sommerfröschen erweisen.

Im folgenden sei ein Hautdruckversuch kurz wiedergegeben:

10.12 h Frosch getötet,

10.27 h Präparat in der Bombe: Das Galvanometer zeigt einen Ruhestrom von 34.0°,

10.30 h Druckbeginn (Rechteckdruck).

Der Manometerzeiger rückt auf 100 Atm. Im gleichen Augenblick fast fällt der Galvanometerzeiger ballistisch von 34,0 auf 33,0, steigt dann bei konstant bleibendem Druck in den nächsten 50 Sek. wieder auf 34,0 und steht nach 90 Sek. schon auf 34,9. Nach 100 Sek. wird der Druck plötzlich auf 0 Atm. abgelassen: Im nächsten Augenblick schnellt der Galvanometerzeiger auf 36,3 und steigt in den folgenden 100 Sek. sogar auf 37,0. Die folgende Tabelle gibt die entsprechenden Werte für die Drucke von 100 bis 800 Atm. wieder. (Unter B ist der ballistische Ausschlag zu verstehen.)

Ausgangsstrom		34,0		
	B	nach 10 Sec.	50 Sec.	90 Sec.
Bei 100 Atm.	33,0	—	34,0	34,9
„ 0 „	36,3	—	36,7	37,0
„ 200 „	33,5	—	35,0	34,9
„ 0 „	39,2	39,5	39,2	39,1
„ 300 „	33,0	—	34,0	33,2
„ 0 „	39,4	—	39,2	39,0
„ 400 „	30,5	31,5	31,0	29,8
„ 0 „	37,8	—	36,5	36,5
„ 500 „	26,0	—	27,2	26,0
„ 0 „	33,0	31,0	32,5	32,7
„ 600 „	23,5	26,0	24,0	22,8
„ 0 „	29,8	28,0	29,0	29,0
„ 700 „	20,0	22,0	21,0	20,0
„ 0 „	27,0	25,0	26,0	26,4
„ 800 „	18,5	19,3	19,0	19,0
„ 0 „	25,5	23,0	23,7	24,0

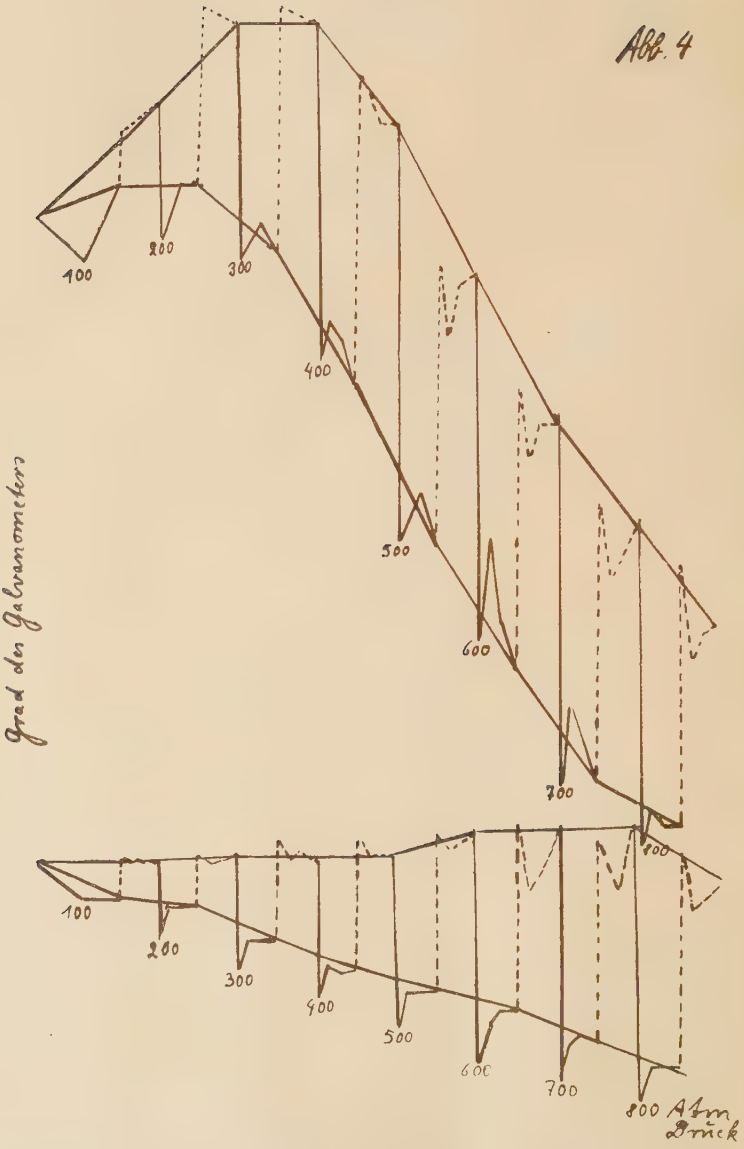
Nun wird das Präparat zum zweiten Male der gleichen Druckprozedur unterworfen bei unveränderter Versuchsanordnung. Der ursprüngliche Ruhestrom der intakten Haut ist inzwischen von 34,0 auf 24,0 abgesunken: die Haut ist durch den ersten Druckversuch offenbar schwer geschädigt worden. Die entsprechenden Werte für die Wiederholung des Druckversuches lauten:

Ausgangsstrom		34,0		
	B	Nach 10 Sec.	50 Sec.	90 Sec.
Bei 100 Atm.	23,0	23,0	23,0	23,0
„ 0 „	24,0	24,0	24,0	23,9
„ 200 „	22,0	22,7	22,7	22,8
„ 0 „	24,0	23,9	24,0	24,0
„ 300 „	21,2	22,0	22,0	22,0
„ 0 „	24,5	24,0	24.2	24,0
„ 400 „	20,5	21,3	21,2	21,2
„ 0 „	24,6	24,0	24,0	24,2
„ 500 „	—	—	—	—
„ 0 „	—	—	—	—
„ 600 „	19,0	20,0	20,3	20,3
„ 0 „	25,0	23,3	23,8	23,8
„ 700 „	—	—	—	—
„ 0 „	—	—	—	—
„ 800 „	18,0	19,0	19,0	18,8
„ 0 „	25,0	22,8	23,0	23,5

Die beiden Versuche sind in Abb. 4 graphisch dargestellt. Die obere Kurve ist die der lebensfrischen, die untere die der druckgeschädigten Haut. Der gestrichelte Teil der Kurven gibt die Galvanometerwerte nach Ablassen des Druckes, der durchgezogene Teil die Werte unter Druck wieder.

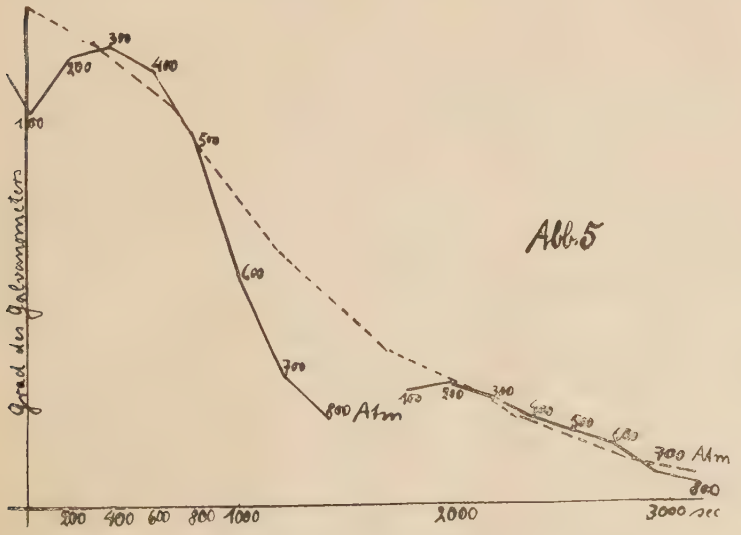
Abszisse = Zeit in Sekunden. Ordinate = Grad des Galvanometers. Die untere Linie verbindet die Druckwerte nach 90 Sk. konstanten Druckes. Die obere Linie verbindet die Druckabfallwerte

Abb. 4

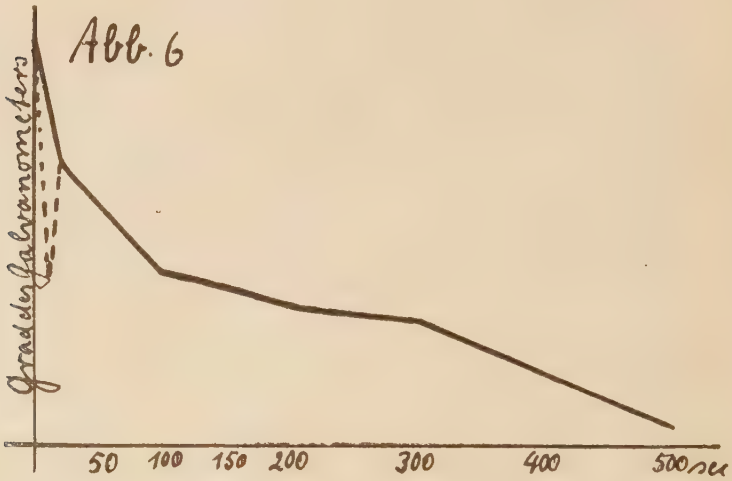

Grad des Galvanometers
100
200
300
400
500
600
700
800
100
200
300
400
500
600
700
800 Atm. Druck

nach 90 Sek.. Um eine die Übersicht störende Durchkreuzung der beiden Kurven zu vermeiden, wird für die untere Kurve eine neue Abszisse gewählt. (Bei der unteren Kurve werden die fehlenden Werte interpoliert.)

Die graphische Darstellung in Abbildung 5 gibt den Versuch wieder, bei dem ein Hautpräparat, das zweimal hintereinander der üblichen Druckprozedur unterworfen wird, verglichen wird mit einem zweiten Hautpräparat vom gleichen Frosch, der unter völlig gleichen Bedingungen, allerdings ohne dem Druck der Bombe ausgesetzt zu werden, mittels Pohl'scher Wippe gleichfalls auf seinen Ruhestrom beobachtet wird. Die Stromkurve des Kontrollpräparates entspricht der gestrichelten Linie. Kurve 1 gibt den Druckversuch der lebensfrischen Haut, Kurve 2 den der gleichen, durch die vorangegangene Druckprozedur schwer geschädigten Haut wieder. Die Zahlen an den Kurvenpunkten bedeuten die Druckhöhe der Bombe in Atm.



Anschließend wird die Wirkung eines primär hohen Druckes (sofortiger Druckanstieg auf 800 Atm.) auf die überlebende Froschhaut untersucht. Die gewonnene Stromkurve gibt Abbildung 6 wieder. (Abszisse = Zeit in Sek. Ordinate = Stromstärke in Grad.) Die gestrichelte Zacke beruht auf einer Schleuderwirkung des Galvanometers.



Den Abschluß der Untersuchungen bilden Versuche mit dem Capillarelektrometer, das mittels Pohl'scher Wippe mit der Galvanometerregistrierung kombiniert werden kann. Die mit beiden Instrumenten gewonnenen Werte ergeben zwei Kurven, die untereinander weitgehend parallel laufen: Die Spannung ändert sich unter Druck qualitativ und quantitativ völlig analog der Stromstärke.

Deutung der Hautversuche:

Im folgenden soll nun versucht werden, die Ergebnisse der Hautversuche, die sich besonders anschaulich und eindrucksvoll in den graphischen Darstellungen widerspiegeln, einmal näher zu betrachten und womöglich zu deuten:

Die beiden Kurven in Abb. 4 zeigen, wie sich die Haut in lebensfrischem und gleich danach in schwer geschädigtem Zustand

unter Druck verhält. Vergleicht man beide Kurven, so lassen sich folgende Unterscheidungsmerkmale herausstellen:

1. Die Stromkurve der überlebenden Haut überragt die der geschädigten ganz erheblich. Mit anderen Worten: Der Ruhestrom ist in seiner Größe bedingt durch den biologischen Zustand der Haut.

2. Druckanstieg und Druckabfall erzeugen bei der lebenden Haut beträchtlich stärkere Stromausschläge als bei der geschädigten, selbst wenn man berücksichtigt, daß die Größe des Stromausschlags u. a. abhängig ist von der Größe des Ausgangsstromes.

3. Die Stromkurve der überlebenden Haut zeigt im Gegensatz zur geschädigten eine gekrümmte Charakteristik mit einem Kulminationspunkt zwischen 200—300 Atm. Sie erinnert damit an die Optimumkurven der Biologie und unterscheidet sich dadurch grundsätzlich von allen übrigen Versuchen mit toter Haut sowie auch von den im ersten Teil beschriebenen Vorversuchen mit unpol. Elektroden, wo die Stromkurven einen linearen, fallenden Verlauf zeigen.

4. Die kleinen Zacken nach erreichter Druckhöhe bzw. nach Druckabfall resultieren aus Schleuderwirkungen des Galvanometers und aus thermischen Überlagerungen, die bei den Vorversuchen als thermischer Effekt sichergestellt werden konnten. Die Kurven in Abb. 5 gestatten einen doppelten Vergleich. Einmal zeigen sie wieder das verschiedene Verhalten der lebensfrischen und der geschädigten Haut, wie es bereits im vorigen Versuch gekennzeichnet wurde.

Zum anderen vermitteln sie uns eine Vorstellung von der schädigenden Wirkung des Druckes: Langsam und gleichmäßig sinkt der Ruhestrom und damit das Leben der ungedrückten Haut dahin, während die gedrückte Haut verhältnismäßig schnell unter der Gewalt des Druckes Ruhestrom und Leben verliert.

Die Kurve in Abb. 6 bestätigt die schädigende Wirkung des Druckes. Dabei ist die Wirkung des primär hohen Druckes so gewaltig, daß sogar die gewohnte Wärmezacke unterdrückt wird. Lediglich die Schleuderwirkung des Galvanometers bedingt die kurzbemessene Kurvenzacke, die in der graphischen Darstellung gestrichelt angedeutet ist.

Bei der Deutung des biologischen Wirkungsmechanismus hoher Drucke auf die überlebende Froschhaut folge ich den Gedankengängen Ebbeckes (U. Ebbecke: Über Reizströme, lokale galvanische Reaktion und Gleichrichterwirkung der Froschhaut, Pflügers Arch. 211. 6. 1926. S. 783):

„Denken wir uns mit Bernstein die reagierende Zellschicht schematisch als eine einfache Lage von Zellen, die nach Hermann an ihrer Außenfläche in schleimiger oder horniger Degeneration begriffen, an ihrer Innenfläche aber von einem intakten Plasmahäutchen abgeschlossen sind, so folgt aus der Membrantheorie, daß diese Zellage mit ihrer ungleichen Jonendurchlässigkeit der Ursprung eines einsteigenden Stromes sein muß. Die Potentialdifferenz der polar verschiedenen Außen- und Innenfläche kann zunehmen, wenn die an sich schon durchlässigere Außengrenzfläche noch weiter aufgelockert wird, sie kann abnehmen, wenn auch die gewöhnlich wenig durchlässige Innengrenzfläche permeabler wird; je nach Stärke und Geschwindigkeit der an den entgegengesetzten Grenzflächen stattfindenden Membranlockerungen ergeben sich verschiedene Kombinationen."

Nehmen wir nun an, daß der Druck die Grenzflächen und damit auch die Membranschichten der Froschhaut verdichtet, wobei die abdichtende Wirkung des Druckes auf die stärker aufgelockerte Außenfläche der Haut entsprechend intensiver ausfällt, so wäre damit das Absinken der Potentialdifferenz erklärt.

Bei Druckabfall erklärt die schlagartige Auflockerung der Membranen die ballistische Zunahme der Potentialdifferenz. Der stärkeren Abdichtung der Außenfläche bei Druckanstieg entspricht eine stärkere Auflockerung der Membranaußenfläche bei Druckablaß.

Der Mechanismus der Membranveränderungen durch den Druck läßt sich in folgender Weise erklären:

Die Membran als submikroskopische Siebplatte betrachtet besteht aus einer stabileren Phase, dem Gerüst aus Eiweiß und Lipoiden, und einer flüssigen Phase, die die Zwischenräume dieses Gerüstes, die Poren, ausfüllt. Es leuchtet ein, daß unter dem Einfluß des Druckes die flüssige Phase auf Grund ihrer höheren Kompressibilität stärker komprimiert wird als das druckresistentere Gerüst. Die Folge

ist, daß sich die Poren verengern. Bei Druckablaß gilt das Gleiche im umgekehrten Sinne.

Im gröberen Sinne ist auch der Tonpfropfen als Siebplatte anzusehen, wobei die Poren in den feinen, mit NaCl gefüllten Kapillarräumen zu suchen sind.

Daraus erklärt sich vielleicht das mit gewissen, später zu erörternden Einschränkungen qualitativ gleichartige Verhalten des Eigenstromes des Elektrodenpräparates und des Ruhestromes der lebenden Froschhaut.

Die interessanten Druckablaßwerte auf Seite 13 lassen eine weitere Vermutung aufkommen:

Drucke bis etwa 300 Atm. haben einen Druckablaßwert, der den Ausgangsruhestrom beträchtlich übertrifft; diese Drucke reizen offenbar die Haut, und die Haut reagiert mit einem Antwortstrom, der an die von Waller und Ebbecke beschriebenen Flammenströme erinnert, die bei elektrischer Reizung der Haut auftreten. Bei oberflächlicher Betrachtung der auf Seite 13 aufgezeichneten Kurvenwerte erscheint es zunächst, als ob nur der Druckablaß von einem Antwortstrom gefolgt ist. Doch bei näherer Prüfung der Druckwerte erkennt man, daß die Druckwerte bis 400 Atm. einen auffallend geringen Stromabfall gegenüber dem Ausgangswert zeigen. Versuch Abb. 5 zeigt diese Erscheinung noch deutlicher, und unter Berücksichtigung der Werte des Kontrollpräparates erscheint es fast zwingend, daß auch der Druckanstieg von einem Antwortstrom gefolgt ist, der allerdings im Druckeffekt untertaucht, aber in der geringen Größe des Druckeffektes seine deutlichen Spuren hinterläßt. Ab 500 Atm. ändert sich das Bild völlig: Die Druckwerte fallen stärker, die Ablaßwerte bleiben deutlich unter der Höhe des Ausgangswertes. Der Reizdruck hat sein Optimum überschritten und ist zum schädlichen Druck geworden, der die Haut schnell und sicher ihrem Tode entgegenführt.

Abschließend soll versucht werden, die Erscheinungen des Reiz- und des schädlichen Druckes zu deuten: Leben setzt geordnete Strukturen voraus. Zur Aufrechterhaltung der Strukturen bedarf es der Energien, die in der Werkstatt der Zelle aus den Rohstoffen des Säftestromes mit den Werkzeugen der Fermente produziert werden.

Fehlen die Rohstoffe, so müssen die Strukturen auseinanderbrechen. Deshalb stirbt die Haut des Kontrollpräparates eines langsamen Todes, da ihre Energiequellen mit Loslösen der Haut vom Säftestrom des Froschorganismus allmählich versiegen.

Wie wirkt nun der Druck auf die Strukturen? Er greift sie unmittelbar an und verändert ihren physiko-chemischen Zustand. Dabei wirken Drucke bis etwa 400 Atm. mehr sensibilisierend, Drucke über 400 Atm. mehr destruierend.

Ob dieser Prozeß reversibel wäre, wenn es gelänge, die geschädigte, isolierte Haut wieder mit dem Säftestrom des Froschorganismus zu verbinden, muß dahingestellt bleiben.

ZUSAMMENFASSUNG.

1. Der Ruhestrom einer frischen, überlebenden Froschhaut nimmt unter der Wirkung des Druckes ab.
   Die Stromabnahme erfolgt ballistisch und ohne nennenswerte Latenzzeit.
   Die Größe der Stromabnahme hängt ab:
   a) von der Höhe des Ausgangsstromes,
   b) von der Druckleistung.
   Für eine qualitativ verschiedene Wirkung des Druckes derart, daß bis zu einer gewissen Druckhöhe, die bei etwa 300—400 Atm. liegt, der Druck die lebende Haut zu einem Antwortstrom reizt, während höhere Drucke die Haut schädigen, ohne einen Antwortstrom zu erzeugen, lassen sich wertvolle Stützen erbringen.
   Bei Druckabfall liegen die Verhältnisse entsprechend umgekehrt.
2. Bleibt die Haut einem konstanten Druck für längere Zeit (über 50 Sec.) ausgesetzt, so ergeben die auf den ballistischen Ausschlag folgenden Stromschwankungen, die sich mit Sicherheit auf thermische Einflüsse zurückführen lassen, eine sinusförmige Kurve. Hinzu tritt eine Schleuderwirkung des Galvanometers.

Bei Druckabfall liegen die Verhältnisse entsprechend umgekehrt.

3. Die druckgeschädigte Haut verhält sich bei einem erneuten Druckversuch wie das Elektrodenpräparat ohne Haut.

Ihre Stromkurven unterscheiden sich von der der lebensfrischen Haut sowohl im Druckeffekt als auch im thermischen Effekt quantitativ und qualitativ:

a) die Stromkurve der lebenden Haut überragt die der toten ganz erheblich,

b) die ballistischen Ausschläge der lebenden Haut sind erheblich größer als die der toten.

c) die tote Haut zeigt nicht die biologischen Merkmale der lebenden Haut: Die Optiumkurve der Druck -und Druckabfallwerte, bedingt durch das Vorhandensein eines Reiz- und eines schädlichen Druckes.

d) Der thermische Effekt tritt mit größerer Deutlichkeit und Regelmäßigkeit bei der toten Haut zutage, während er bei der lebenden Haut je nach den Bedingungen in verschieden starkem Maße verstärkt bzw. unterdrückt wird.

4. In allen Versuchen zeigt das elektrische Meßinstrument die Resultierende an aus den unmittelbaren und den mittelbaren Komponenten des Druckes.

LEBENSLAUF.

Am 14. Juni 1914 wurde ich als Ältester von 11 Kindern der Eheleute Heinrich Mückter und Margarete geb. Jäger zu Körrenzig, Kreis Jülich, geboren. Nach sechsjährigem Besuch der Volksschule zu Körrenzig trat ich Ostern 1926 in die Quinta des Staatlichen Gymnasiums zu Jülich ein, wo ich Ostern 34 meine Reifeprüfung ablegte. Nach Ableistung des Arbeitsdienstes zu Goch am Niederrhein immatrikulierte ich mich am 3. November 1934 für Medizin an der Universität Bonn. Am 15. Oktober 1935 legte ich den I., vom 23. bis 25. Februar 1937 den II. Abschnitt meiner ärztlichen Vorprüfung in Bonn ab. Nach einem Semester in Freiburg kehrte ich zum WS. 1937/38 nach Bonn zurück, wo ich nach dem SS. 1939 mein Studium beendete.